v2.0 Nov.2015

レーダの原理

-無線機器の原理と操作-

1st. 2013/05/20

Lst. 2015/11/03

通信ネットワーク工学科

語源

RADAR

Radio Detection and Ranging

（電波による探知および測距）

LIDAR

Light Detection and Ranging

（光波による探知および測距）

SONAR

Sound Navigation and Ranging

（音波による航行および測距）

山に向かって大声で叫ぶとエコー（こだま、反響）が返ってくる。いま、発声からエコーを聞くまでの時間を 2 秒とすれば、声は 340×2=680 m（ただし、音速は 340 m/s とする）の距離を伝搬したことになる。したがって、発声者と対面している山との距離 R は 680 m の半分 R=340 m である。**レーダはこれを光速 c=3×10⁸ m/s に置き換えて**考える。

レーダ方式による分類

方式

- パルスレーダ
- FM-CWレーダ
- ドップラーレーダ
- モノパルスレーダ
- 定在波レーダ

Primary radar

一次レーダ

送信局より発射した電波がターゲットに反射して戻ってきた信号から，ターゲットの位置や距離を測定する方式

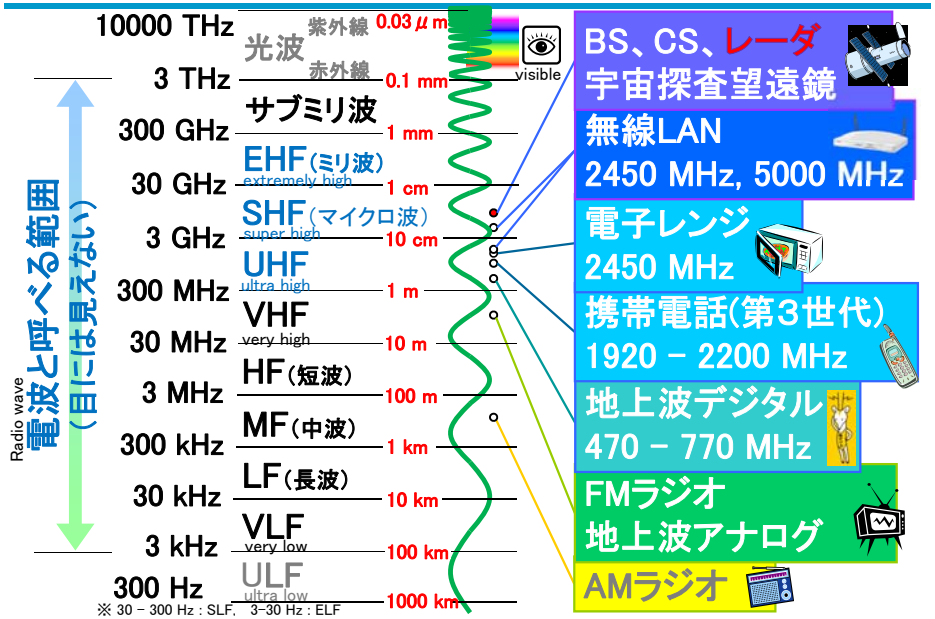
Secondary surveillance radar system (SSR)

二次監視レーダ方式（二次レーダ）

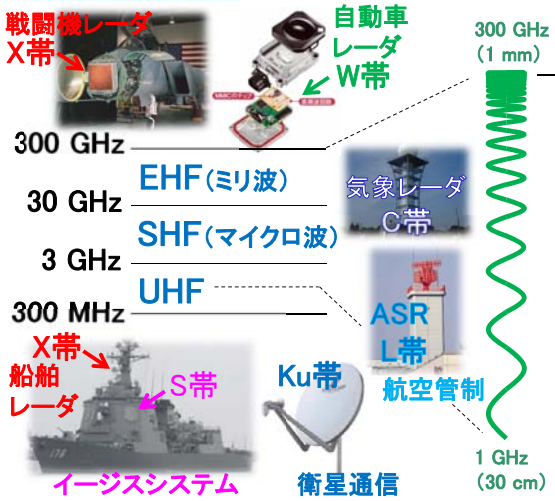
送信局：インタロゲータより発射した電波を受信した相手局：トランスポンダーが，種類・位置・高度・速度等の応答信号を発射し，これを送信局が受信してターゲットの情報を取得する方式

日本航空広報部, ``最新 航空実用ハンドブック'' p.185, 朝日新聞出版, 2014
上保「定在波レーダの原理とその応用」pp.106-107, RF ワールド No.8, CQ 出版
須田, ``電磁波測距儀（改訂版）,'' 森北出版, 1971

電波の名称と周波数帯



マイクロ波，ミリ波帯の識別記号



Frequency range	Band
100 – 300 GHz	mm
75 – 110 GHz	W
40 – 75 GHz	V
27 – 40 GHz	Ka※
18 – 27 GHz	K
12 – 18 GHz	Ku※
8 – 12 GHz	X
4 – 8 GHz	C
2 – 4 GHz	S
1 – 2 GHz	L

※Ka (“above” K-band)
※Ku (“under” K-band)

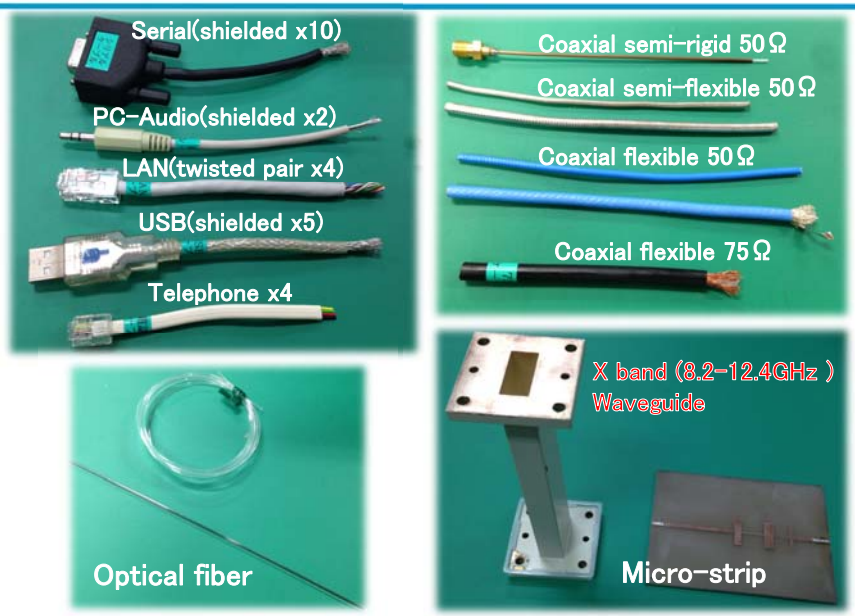
http://www.masdf.com/eagle/anpag63.html
http://techon.nikkeibp.co.jp/article/HONSHI/20090330/168029/
Thomas H. Lee, Planar Microwave Engineering, p.39 , Cambridge
Mark A. Richards, et al, Principles of modern radar, Scitech

出力電力の比較例 （参考）

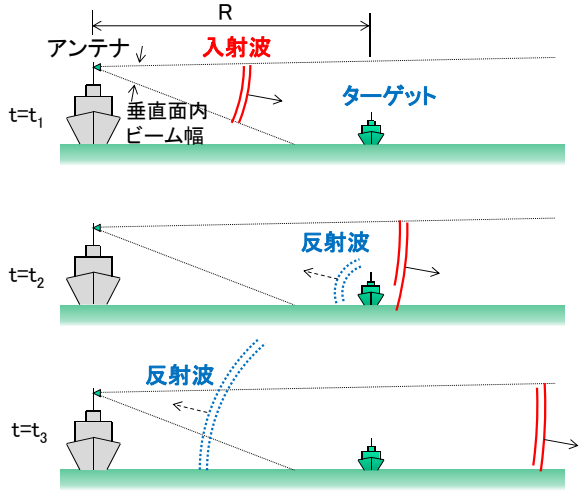
1. 蛍光灯（スタンド）：30 W（夜でも十分勉強できる）
2. ノートパソコン（Windows7）：20 W（何とか仕事できる）
3. デスクトップパソコン（Windows）：50 W（多様な仕事ができる）
4. 液晶テレビ（40型）：120 W（テレビが見られる）
5. 電子レンジ（家庭用）：500–750 W（ごはん1杯=40秒）
6. 電子レンジ（業務用）：1,500 W（ごはん1杯=10秒）
7. 船舶レーダ（民間用）：5–30 kW（R_{max}≒30 km）
8. 戦闘機レーダ（F-22, AN/APG-77）：12 kW（R_{max}≒250 km）
9. イージス艦レーダ（SPY-1）：4–6 MW（R_{max}≒400 km）
10. 固定式警戒管制レーダ（FPS-7）：? MW（R_{max}≒430 km）
11. 早期警戒レーダ（E-767 AWACS）：? MW（R_{max}≒800 km）

http://www.geocities.co.jp/Playtown-Knight/9679/JASDF/E-767.html

種々の伝送線路



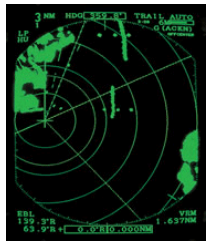
距離測定の原理（パルス方式）



送信開始してから、反射波が観測されるまでの時間をｔとすれば

$$R = \frac{ct}{2} \quad \cdots(1)$$

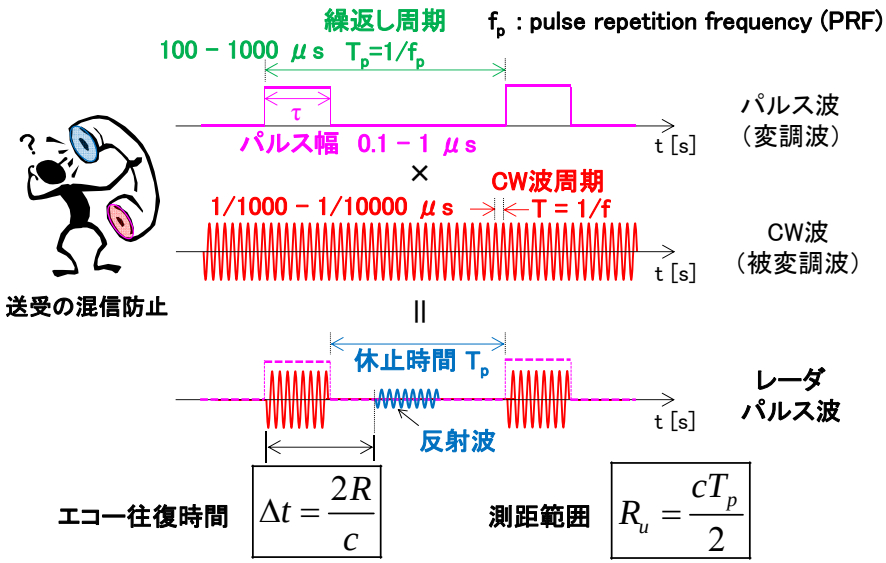
ただし、ｃは光速である。



1 NM（Nautical Mile：海里）＝1852 m（約6076フィート）

https://www.furuno.co.jp/technology/about/radar1.html
落合，茂在，``レーダの理論と実際,'' pp.20-21, 海文堂, 1959

距離測定の原理（パルス方式）



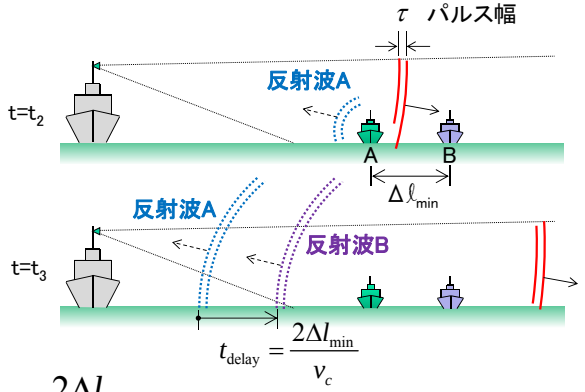
エコー往復時間 $\Delta t = \dfrac{2R}{c}$

測距範囲 $R_u = \dfrac{cT_p}{2}$

問：パルス繰り返し周波数が f_p=1 kHz のとき測距範囲は幾らか？

答え 150 km

距離測定の分解能



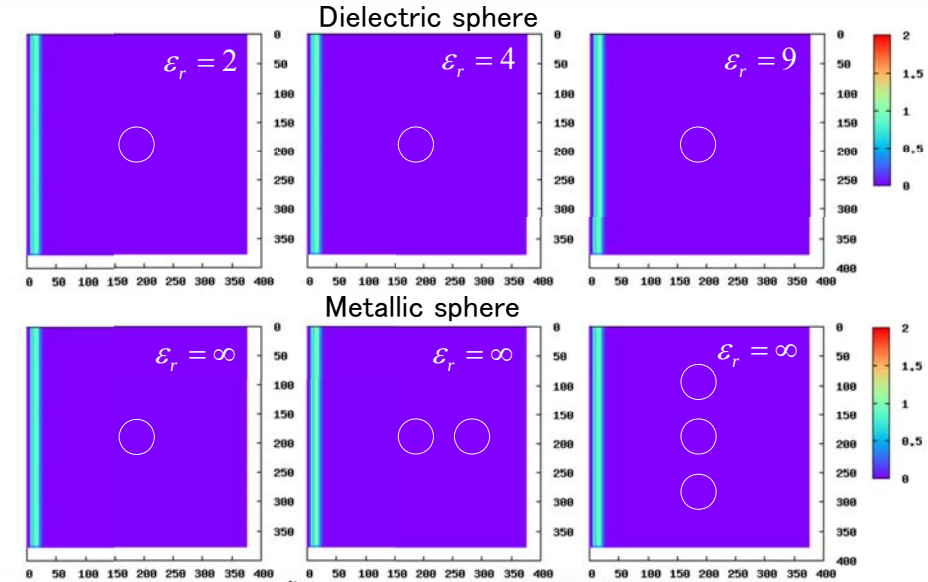
$t_{delay} = \dfrac{2\Delta l_{min}}{v_c} = \tau$ に等しいとき、反射波A と 反射波B は引っ付いてターゲットAとターゲットBを分離できない

径方向の分解距離 Δl はパルス幅 τ に比例して劣化する $\Rightarrow \boxed{\Delta l_{min} = \dfrac{\tau v_c}{2}}$

落合，茂在，``レーダの理論と実際,'' pp.20–21, 海文堂, 1959

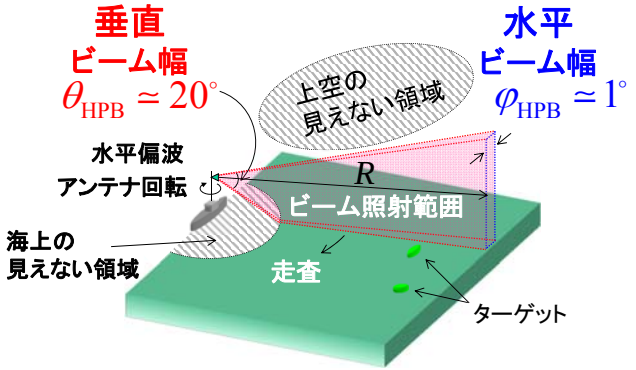
問：パルス幅 τ =1 μs のとき距離分解能は幾らか？ 答え 150 m

散乱のシミュレーション



http://www.cn.kagawa-nct.ac.jp/~kusama/study/cem/fdtd/fdtd_2dtm/fdtd_2dtm.html

方位測定の分解能



方位方向の分解距離 Δx は探知距離 R に比例して劣化する。

$\Rightarrow \boxed{\Delta x = \varphi_{HPB} R}$

※ Half Power Beam width (HPB)

【参考】 FURUNO FAR-2107/2807 シリーズ 25 kW, 9410 MHz

問：水平ビーム幅 ϕ=1 ° のとき，R=6 km における方位分解能は幾らか？ 答え 約100 m

レーダ方程式（その1）

【探知距離】

送信アンテナから電波を放射してターゲットで反射されて帰ってくるまでのエコー観測時間を t [s] = τ [μs]，電波の速度 c = 3×10^8 [m] とすると，反射物までの距離 r [m] は次式となる。

$$r=\frac{ct}{2}=1.5t\times10^8\,\mathrm{m}=150\tau\ [\mathrm{m}] \qquad (1)$$

【最大探知距離】

レーダーからの放射電力を P_t [W] とすると、距離 r [m] 離れた位置の電力密度 p_0 [W/m^2] は

$$p_0=\frac{P_t}{4\pi r^2} \qquad (2)$$

となる。アンテナ（指向性）利得を G_t とすると，同じく距離 r [m] 離れた位置の電力密度 p_G [W/m^2] は式(2)より

$$p_G=p_0G_t=\frac{P_t}{4\pi r^2}G_t \qquad (3)$$

問　エコー観測時間を t = 10×10^{-6} s = 10 μs とすると，ターゲットまでの距離 R は幾らか？　答え 1500 m

レーダ方程式（その2）

ここで，レーダー反射断面積を σ [m^2] とすると，物体から再放射される電力 P_σ [W] は(3)式より

$$P_\sigma=p_G\sigma=\frac{P_t}{4\pi r^2}G_t\sigma \qquad (4)$$

送信アンテナがある位置に戻るエコー電力密度 p_{r0} [W/m^2] は

$$p_{r0}=\frac{P_\sigma}{4\pi r^2}=\frac{P_tG_t\sigma}{(4\pi r^2)^2} \qquad (5)$$

アンテナ有効面積を A_e [m^2] とすると，受信電力※1は

$$P_r=p_{r0}A_e=\frac{P_tG_t\sigma A_e}{(4\pi r^2)^2}=\frac{P_tG_t\sigma A_e}{(4\pi)^2r^4} \qquad (6)$$

アンテナ利得 G_t とアンテナ有効面積 A_e [m^2] の関係※2

$$G_t=\frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \qquad (7)$$

※1 アンテナを送受で共用するモノスタティックレーダの場合 $G_r=G_t$ となる。

※2 F. T. Ulaby ``Fundamentals of Applied Electromagnetics, Fifth Ed.'' p.438, Prentice Hall, 2007

レーダ方程式（その3）

を使って一方を消去すると

$$P_r=\frac{P_t\sigma G_t}{(4\pi)^2r^4}A_e=\frac{P_t\sigma G_t}{(4\pi)^2r^4}\frac{\lambda^2G_t}{4\pi}=\frac{P_tG_t{}^2\lambda^2\sigma}{(4\pi)^3r^4} \qquad (8)$$

受信電力は距離の4乗に反比例

または

$$P_r=\frac{P_t\sigma A_e}{(4\pi)^2r^4}G_t=\frac{P_t\sigma A_e}{(4\pi)^2r^4}\frac{4\pi A_e}{\lambda^2}=\frac{P_t\sigma A_e{}^2}{4\pi\lambda^2r^4} \qquad (9)$$

最小探知電力を $P_{r\,\min}$ と置き，最大探知距離 r について書き直すと

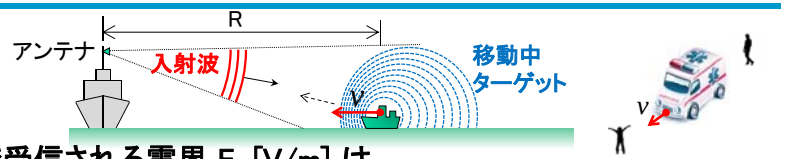
$$r=\left(\frac{P_tG_t{}^2\lambda^2\sigma}{(4\pi)^3P_{r\min}}\right)^{\frac{1}{4}}\quad\text{or}\quad r=\left(\frac{P_t\sigma A_e{}^2}{4\pi\lambda^2P_{r\min}}\right)^{\frac{1}{4}} \qquad (10)$$

式(10) をレーダー方程式と呼ぶ。即ち，1. 最小探知電力が小さく　2. ターゲット反射断面積が大きく　3. 送信電力が大く　4. アンテナ利得が大きく　5. 波長が長い ほど，遠くまで探知できることが分かる。

問　f = 10 GHz，出力 100 kW の電波を実効面積 1 m^2 のレーダアンテナから放射した。ターゲットの反射断面積が σ = 10 m^2，最小探知電力 $P_{r\,\min}$ = 5 pW のとき，最大探知距離 R は幾らか？

三輪進 ``高周波電磁気学'' p.199, 東京電機大学出版局, 1992.　答え 65 km

速度測定の原理（ドップラー方式）



アンテナで受信される電界 E_r [V/m] は

$$E_r=E_0e^{j(\omega_t t-k2R)} \qquad (1)$$

となる。ターゲットが速度 v [m/s] で移動している場合の伝搬距離は $R=2R_0-vt$ に変化するので，受信電界は

$$E_r=E_0e^{j(\omega_t t-k2(R_0-vt))} \qquad (2)$$

となる。ここで，受信電界の位相部分を φ とおくと

$$\varphi=\omega_t t-k2(R_0-vt) \qquad (3)$$

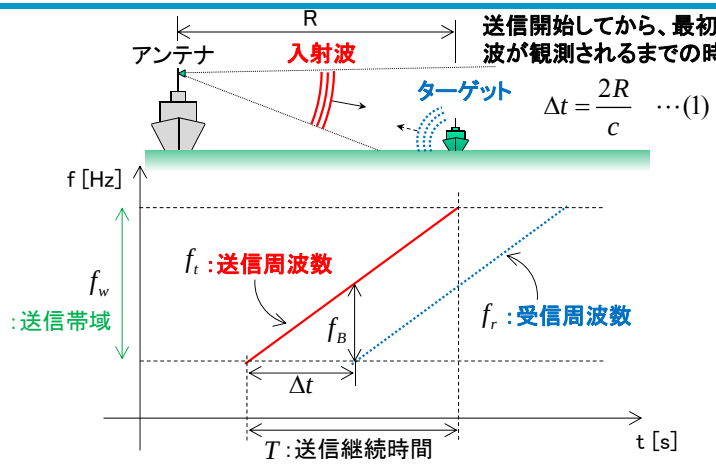
両辺を t で微分すると，受信電界の角周波数 ω_r が求まる。

$$\frac{d\varphi}{dt}=\omega_r=\omega_t+2kv\ \Rightarrow\ \boxed{f_d=\frac{\omega_d}{2\pi}=\frac{2kv}{2\pi}=\frac{2v}{\lambda}} \qquad (4)$$

f_d をドップラー周波数と呼び，周波数変化から移動速度が求まる。

F. T. Ulaby ``Fundamentals of Applied Electromagnetics, Fifth Ed.'' p.439, Prentice Hall, 2007

距離測定の原理（FM-CW方式）



送信開始してから、最初の反射波が観測されるまでの時間は

$$\Delta t = \frac{2R}{c} \quad \cdots(1)$$

三角形の相似より、

$$\frac{\Delta t}{f_B} = \frac{T}{f_w} \Rightarrow \Delta t = \frac{f_B T}{f_w} \quad \cdots(2)$$

(1)と(2)より、送受距離は

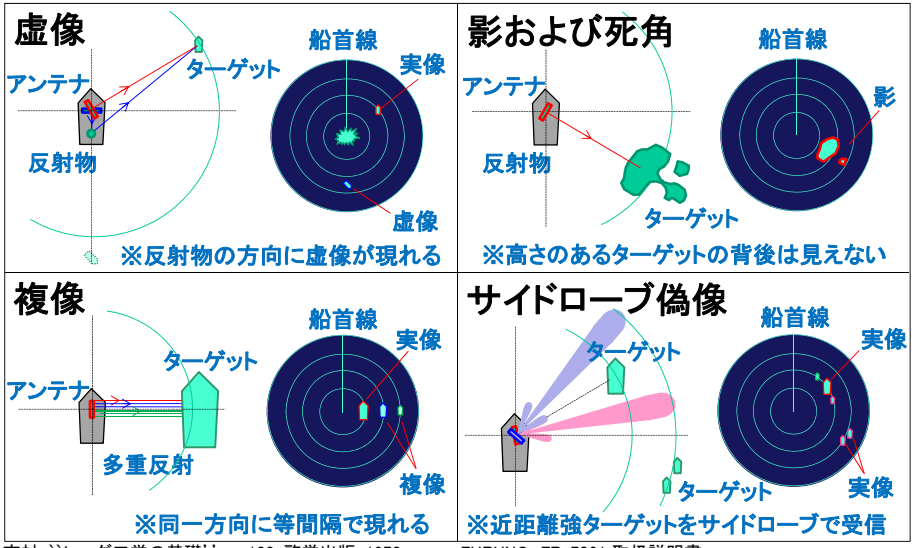
$$\boxed{R = \frac{cTf_B}{2f_w}} \cdots(3)$$

で求まる。

上保「定在波レーダの原理とその応用」pp.106-107, RF ワールド No.8, CQ 出版

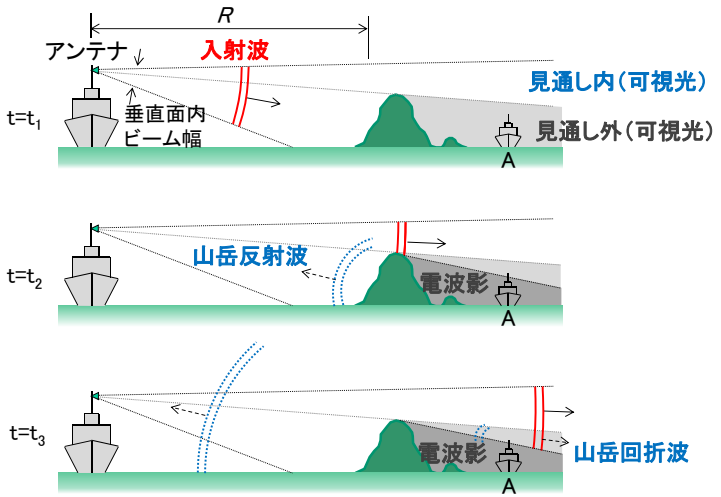
偽像の種類

偽像　実際には存在しないターゲットが画面上に表示される現象



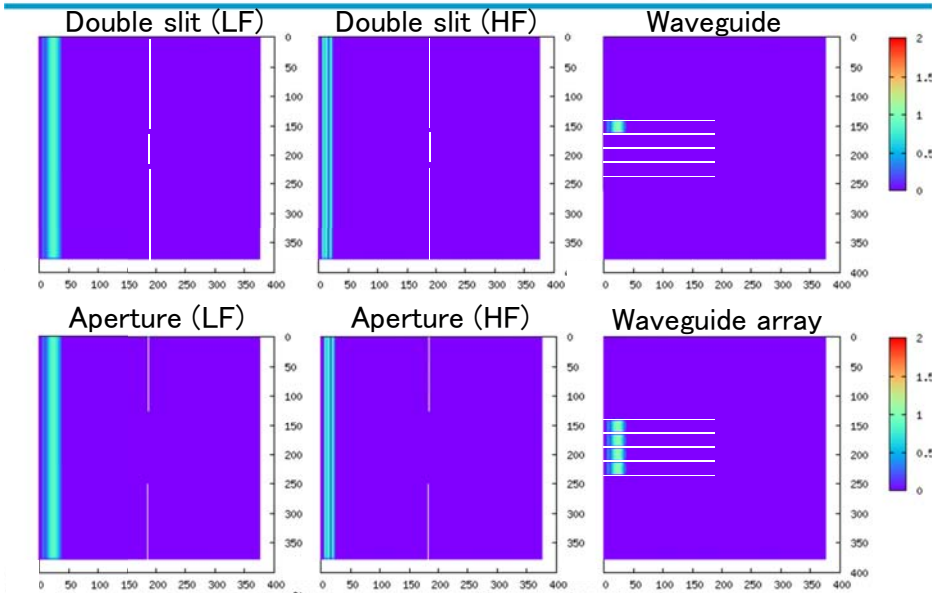
吉村，``レーダ工学の基礎'' pp.132, 啓学出版, 1972.　FURUNO FR-7061 取扱説明書

見通し外ターゲットの検出限界



落合，茂在，``レーダの理論と実際,'' pp.20-21, 海文堂, 1959

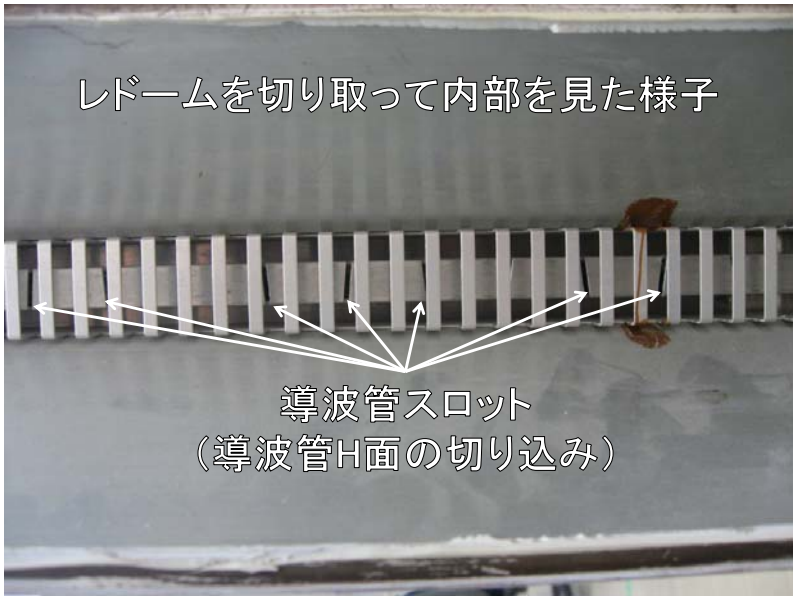
回折のシミュレーション



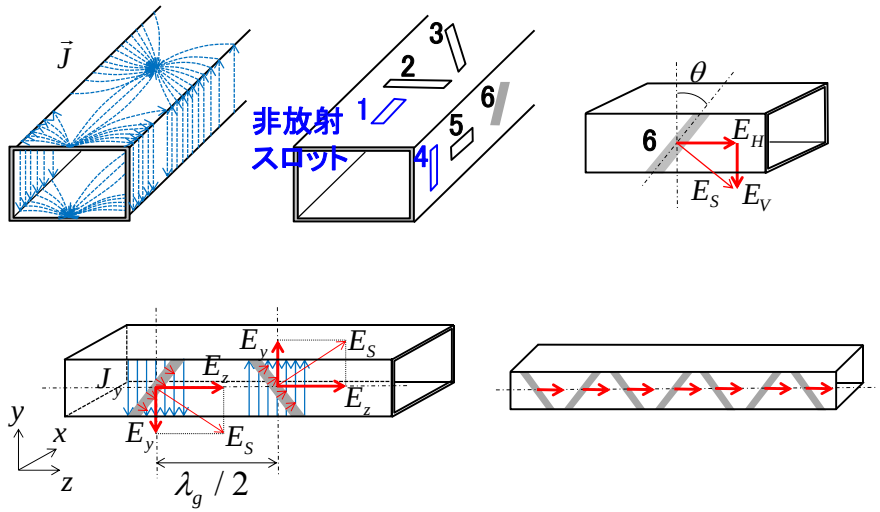
http://www.cn.kagawa-nct.ac.jp/~kusama/study/cem/fdtd/fdtd_2dtm/fdtd_2dtm.html

レーダアンテナ （概観）

レーダアンテナ （開口部）



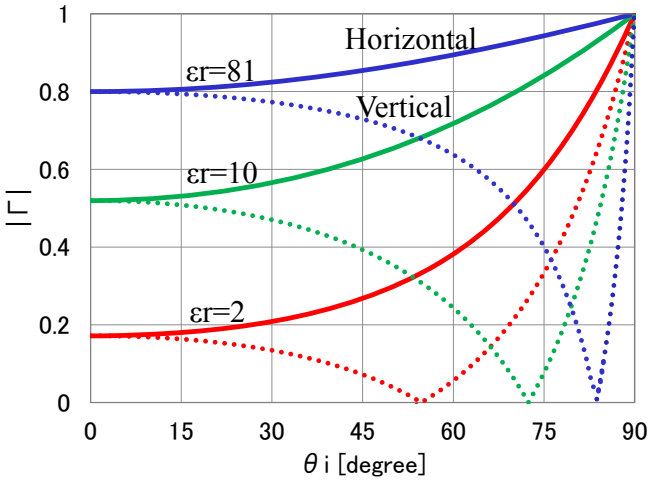
レーダアンテナ



吉村, ``レーダ工学の基礎'' pp.144-145, 啓学出版, 1972

偏波による反射係数の違い

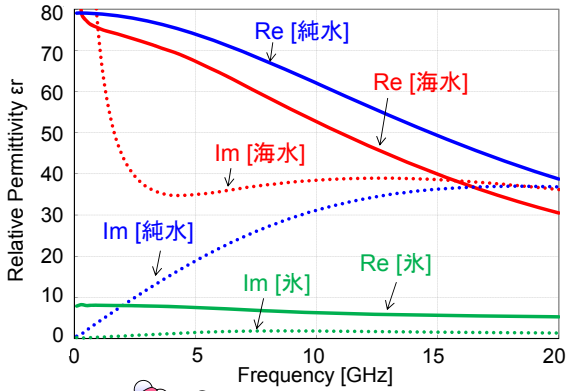
空気から誘電体へ斜入射したときの反射率

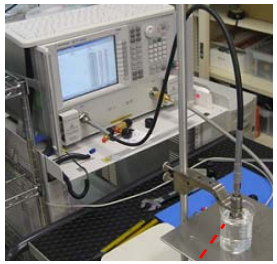


ー水平偏波と垂直偏波では反射率が異なるー

比誘電率 （その1）

純水・海水・氷の複素比誘電率の違い

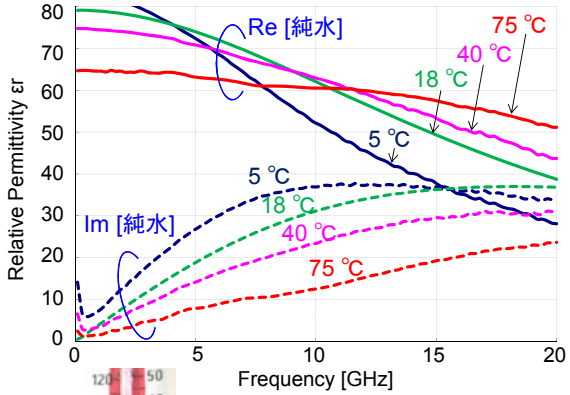


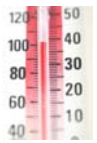


前田, ``同軸プローブ法による複素誘電率測定,'', 詫間電波高専卒業研究論文集, T-2011 (H23)　※仏教では観の転換

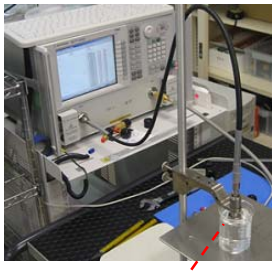
比誘電率 （その2）

温度による純水の複素比誘電率の違い





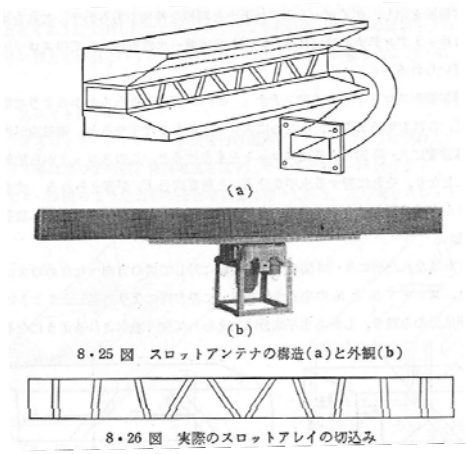
抵抗（導電率）に温度特性があるように、分子の格子振動によって誘電率にも温度特性がある



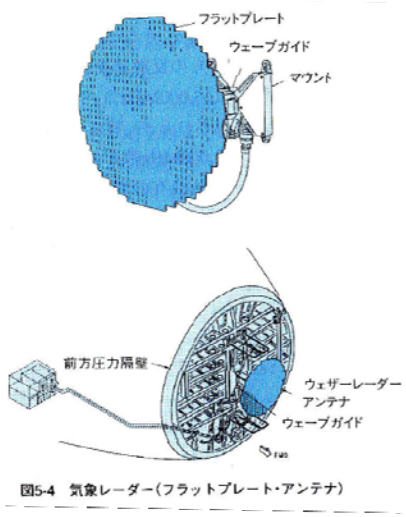
前田, ``同軸プローブ法による複素誘電率測定,'', 詫間電波高専卒業研究論文集, T-2011 (H23)　※仏教では縁起

レーダアンテナの例

船舶アンテナの例



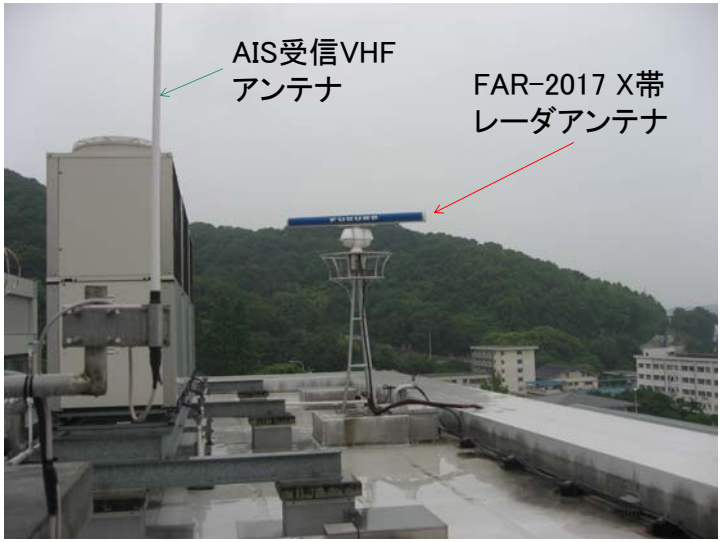
B747-400のレドーム内部



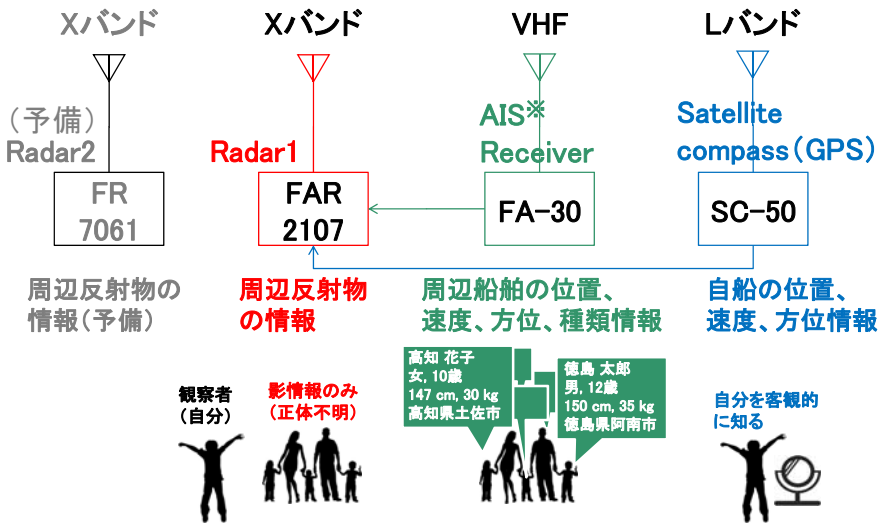
吉村, ``レーダ工学の基礎'' pp.146, 啓学出版, 1972. より引用
日本航空広報部, ``最新 航空実用ハンドブック'' p.185, 朝日新聞出版, 2014　より引用

屋上取り付けアンテナ

屋上取り付けアンテナ

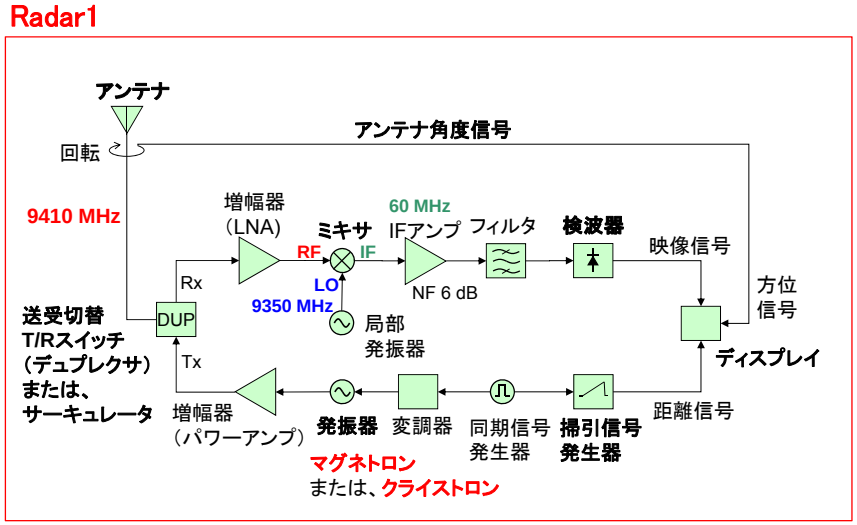


レーダ実験局の構成例



※ Automatic Identification System（AIS）： 船舶自動識別装置 300トン以上の全ての船舶に搭載義務あり

レーダ測定系の一例

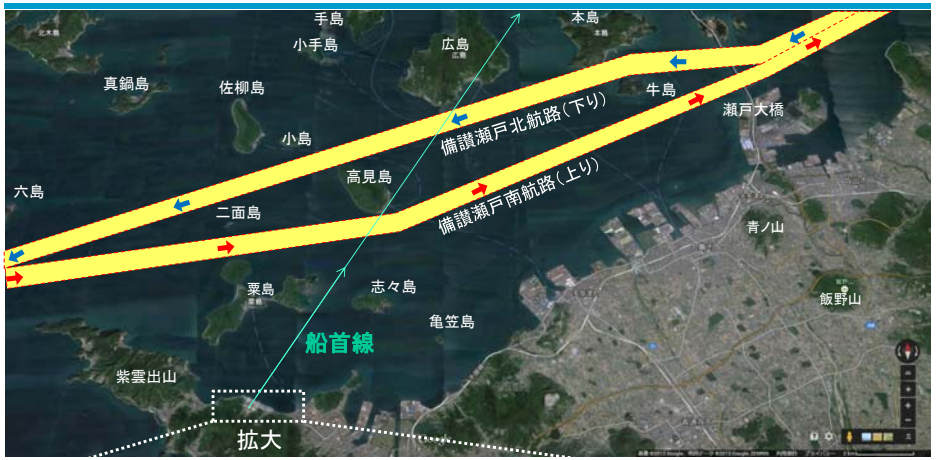


問：なぜヘテロダインを使ってダウンコンバートするのか？

【参考】 FURUNO FAR-2107/2807 シリーズ 25 kW, 9410 MHz

答え 集中定数回路が使えるため

実験局の周辺地図と航路



レーダ画面出力表示例（参考）

自船位置をGPS1に設定→ 進行角度が表示される

出力電力の比較例（参考）

レーダ画面出力表示例（参考）

表示画面＋プロッターを選択

ノースアップ
の状態で

レーダ画面出力表示例（参考）

表示画面＋プロッターを選択

ノースアップ
の状態で

ローレンツ力

【演習】 電子の円運動の周期に対応する周波数を求めよ。ただし、B=0.1Tとする。

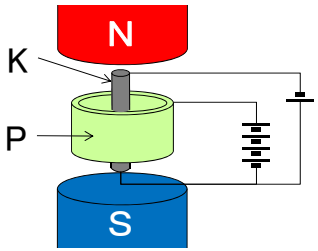
ローレンツ力と円運動の向心力より

$$F = m\frac{v^2}{r} = evB$$
$$\Rightarrow m\frac{(r\omega)^2}{r} = e(r\omega)B$$
$$\Rightarrow \omega = \frac{eB}{m}$$

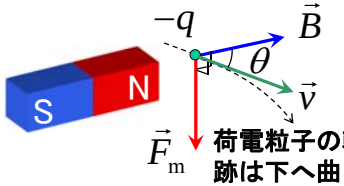
ここから振動周波数を求めると

$$f = \frac{1}{2\pi}\frac{eB}{m} = \frac{1}{2\times 3.14}\frac{1.6\times 10^{-19}\times 0.1}{9.1\times 10^{-31}}$$
$$= 2.8\,\mathrm{GHz}$$

の**電気振動**が得られる。



K: cathode（陰極）
P: plate（陽極）

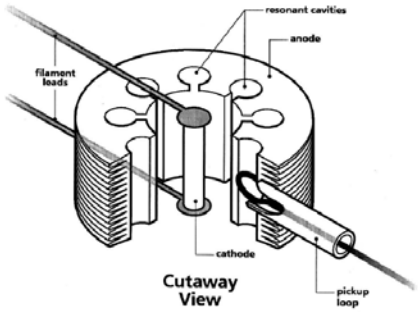


荷電粒子の軌跡は下へ曲げられる

好村 ``光と電波'' pp.135–136, 培風館

マグネトロン発振器

Magnetron は電子に働くローレンツ力（磁気力）を利用しているので，磁電管とも呼ばれる。
実用周波数範囲：1–200 GHz
出力：1–2 kW, 25–100 kW（レーダ用ではパルス出力尖頭値が数MW）
家庭用では電子レンジで，2450±50 MHz，出力 500 Wが主流



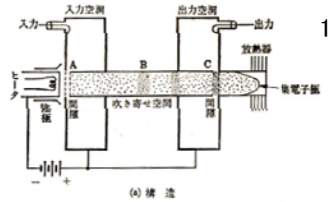
応用例
- レーダの発振器
- 電子レンジの発振器
- 薄膜のスパッタリング

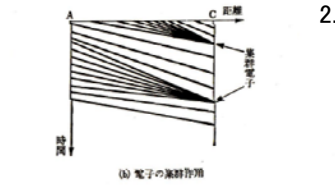
B. Hammack, P. Ryan, N. Ziech, ``Eight amazing engineering stories,'' pp.153–163, Articulate Noise Books, 2012.
吉村，倉持，安居院，``図解入門 よくわかる最新電波と周波数の基本としくみ,'' pp.129–130, 秀和システム

クライストロン発振器

クライストロン Klystron
- 直進形 電子の粗密波を利用して増幅器として利用
- 反射形 電子の粗密波を利用して発振器として利用

真空管の問題点（電子の走行時間が有限であること）を積極的に利用



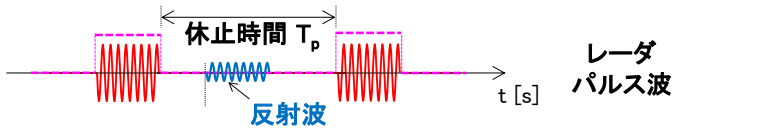


1. 陰極を出た電子はまず、入力空洞の間隙Aを通過する。このとき、入力信号に応じて発生している電界によって**速度変調**を受ける。この電子は出力空洞に達するまでの区間Bで**集群作用**を受ける（A点において、あるとき**減速された電子は、次に加速された電子に追いつかれてC点で凝集**する）。
2. C点の間隙には**電子の粗密波**が生じ、これによって出力空洞に**電界が誘導**される。即ち、熱電子の粗密波を使って出力空洞に強い電界を生じさせることができるので、**増幅器としての利用**ができる。

中島 ``マイクロ波工学,'' p.219–221, 森北出版

クライストロンという名称は、浜辺で "波が砕ける" という意味のギリシア語 *klyzo* からつけられた。 http://kids.kek.jp/jiten/matter/

検波器



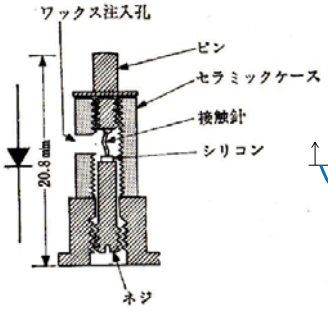
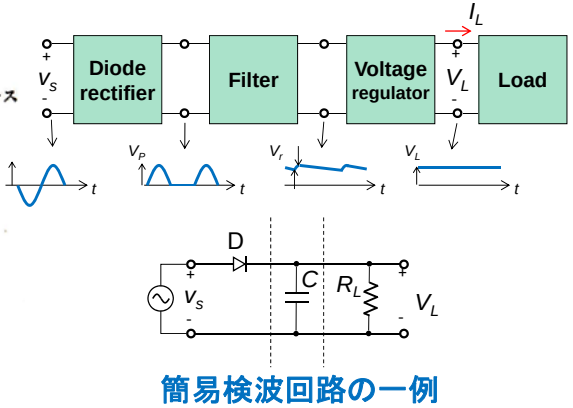


図 10-1 検波ダイオード (1N23B タイプ)



簡易検波回路の一例

中島将光, ``マイクロ波工学 基礎と原理,'' p.237, 森北出版, 1975.